第47卷 第2期
2024年2月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 2
Feb. 2024

河西走廊潜在蒸散发时空格局变化与气象因素的关系

马亚丽， 牛最荣， 孙栋元

（甘肃农业大学水利水电工程学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：蒸散发过程影响因素众多，潜在蒸散发（ET_0）与气象变量交互作用复杂，亟需揭示ET_0变化对气象变量的响应机理。基于河西走廊及周边21个气象站点气象资料，采用定性定量分析方法，以河西走廊整体及3分区2个空间尺度，揭示ET_0时空变化规律，明确ET_0对各气象因素变化敏感性及贡献。结果表明：(1) 河西走廊及分区ET_0均呈显著波动上升趋势（$Z>1.98$），线性变化率2.94 mm·a^{-1}，且黑河分区变化最明显。(2) ET_0由东南向西北递增变化，中东部石羊河分区（1003.78 mm）、黑河分区（1031.30 mm）较小，西部疏勒河分区（1171.89 mm）较大。(3) 河西走廊ET_0对气象因素变化敏感性排序为相对湿度（RH）、日最高气温（T_{max}）、日照时数（n）、平均风速（u）、日降水量（P），ET_0对RH减少最敏感，对P变化最不敏感。(4) u增大是造成河西走廊ET_0增大的主要原因，其次是RH减少、T_{max}升高、n增加。(5) 疏勒河分区、黑河分区、石羊河分区ET_0呈增加变化，贡献最大因素分别为T_{max}（5.13%）、u（8.22%）、T_{max}（5.97%），贡献最小因素为n。气候因素中的风速和气温变化是河西走廊地区ET_0变化不容忽视的重要影响因素，研究成果对合理规划农田灌溉用水和提高农业水资源利用效率意义重大。

关 键 词：潜在蒸散发；气象变量；响应；定量关系；河西走廊

文章编号：1000－6060(2024)02－0192－11(0192～0202)

蒸散发作为气候系统的中心环节，是地表水量和热量平衡的重要参量，影响水循环和能量循环过程，促使区域生态、气候和农业生产发生变化[1]。潜在蒸散发（ET_0）表征一定气象条件下在地表供水不受限时的蒸发能力，是估算作物需水量的关键参数，其变化受气温、风速、相对湿度和太阳辐射等多种气象因素的共同影响[2]，是探明气候变化特征及机理的重要参数之一。全球气候趋暖背景下，中国西部地区1987年前后经历由暖干向暖湿转型的明显变化，且变暖程度高于全国平均水平[3-4]。因此，揭示中国西部暖湿变化影响下，ET_0的演变规律及响应机制具有重要意义。

针对ET_0对气候变化的响应及归因分析，已开展一些有意义的研究。黄会平等[5]采用主成分分析方法，发现影响中国ET_0变化的主要因素是热力学因素。李霞等[6]利用通径分析及敏感性分析，辨识了科尔沁湿草甸ET_0变化的影响因子，明确主要因子是饱和水汽压差、最低气温。郭雯雯等[7]基于敏感性分析和贡献率定量识别方法，认为相对湿度、风速是影响渭河流域ET_0变化的主导因子。郭小娇等[8]采用相关分析法，研究发现日照时数、风速是影响桂林市ET_0变化的主要因素。对于影响ET_0变化的气象因子的定量评价研究[5-8]，多局限于某一两种分析方法，研究方法相对单一。但是，关于ET_0与气象变量响应关系研究，多种定性、定量分析方法均适用。由于蒸散发过程涉及大气、植被、地

收稿日期：2023-03-10； **修订日期**：2023-06-06

基金项目：国家自然基金项目(42261003)；寒旱区水文及水资源综合调控利用研究团队(GAU-XKTD-2022-08)；甘肃农业大学水利水电工程学院科研团队建设专项资助项目(Gaucwky-04)；甘肃省重点研发计划项目(21YF5FA094，21YF5NA015)；甘肃省水利厅水资源研究项目(GSAU-JSZX-2020-1205)资助

作者简介：马亚丽(1987-)，女，硕士，讲师，主要从事水文与水资源等方面的研究. E-mail: mayal@gsau.edu.cn

表等多个系统[9]，影响因素众多，且ET_0与气象变量间以及各气象变量间的交互作用较为复杂[10]，对ET_0与气象变量的响应研究，定性与定量多种方法有机结合显得尤为重要。

河西走廊位于黄河以西的干旱西北内陆，属于典型的温带大陆性气候，南部、北部均为山地，中部为走廊平原，降水小、蒸发强烈、生态环境脆弱、水资源匮乏是制约当地经济社会发展，导致生态环境恶化的重要原因。探究河西走廊ET_0变化特征及其与气象变量的响应关系，对揭示西北暖湿变化背景下水文循环响应机理、水资源高效利用均具有重要意义。本文将多种定性与定量分析方法有机结合，主成分分析、聚类分析、相关系数分析、通径分析从相关关系的角度定性探究ET_0变化的原因，敏感性分析、贡献率计算定量探寻ET_0变化对气候变量的敏感程度和气候变量的贡献，揭示中国西北暖湿变化影响下，ET_0变化对气象变量的响应机理。研究成果为河西走廊地区合理规划灌溉用水，促进农业水资源高效利用提供科学决策依据。

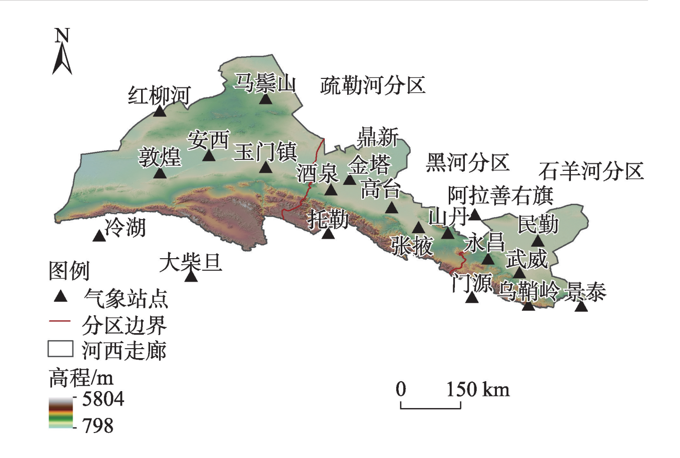
1 数据与方法

1.1 数据来源

气象数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn)，包括河西走廊及周边21个气象站点1984—2019年平均气温、日最高气温、日最低气温、相对湿度、降水、风速、日照时数、海拔高度、纬度等数据。ET_0是基于世界粮农组织(FAO)修正后(1998年)Penman-Monteith公式[11]计算，该公式被广泛应用，具体见文献[11-12]。河西走廊地理位置及气象站点分布见图1所示。FAO Penman-Monteith公式[11]如下：

$$ET_0=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)} \quad (1)$$

式中：ET_0为日潜在蒸散量(mm·d^{-1})；Δ为饱和水汽压曲线斜率(kPa·℃$^{-1}$)；R_n为太阳净辐射(MJ·m^{-2}·d^{-1})；G为土壤热通量(MJ·m^{-2}·d^{-1})，日尺度记为0，忽略不计；γ为干湿常数(kPa·℃$^{-1}$)；u_2为地面以上2 m风速(m·s^{-1})；T为日平均气温(℃)；e_s-e_a为饱和水汽压差值(kPa)。除以上收集的气象数据，FAO Penman-Monteith公式中其他输入变量涉及多个公式及中间变量的计算，由以上基础气象数据推导计算得到，



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2022)4307号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 河西走廊气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the Hexi Corridor

参阅文献[11]。

1.2 变化趋势分析

文中采用线性回归及Mann-Kendall非参数检验[13]，揭示河西走廊及各分区ET_0及气象变量时间序列的变化趋势。Mann-Kendall法无样本数据分布要求，对非正态分布的水文气象等数据有良好适用性[14]。

1.3 定性分析方法

1.3.1 主成分分析 主成分分析通过变量转换，减少变量个数，且最大限度保留原始信息，新变量间互不相关，从而简化原模型[15]。主成分计算[16-17]见式(2)、式(3)所示：

$$\begin{aligned}Y_1&=c_{11}X_1+c_{12}X_2+\cdots+c_{1p}X_p\\Y_2&=c_{21}X_1+c_{22}X_2+\cdots+c_{2p}X_p\\&\vdots\\Y_p&=c_{i1}X_1+c_{i2}X_2+\cdots+c_{ip}X_p\end{aligned} \quad (2)$$

式中：Y为新的综合变量；气象因子变量$X=(X_1, X_2, \cdots, X_p)'$；$p$为主成分总数；$c_i=(c_{i1}, c_{i2}, \cdots, c_{ip})$为第$i$个气象因子变量$X$特征值对应的正交单位特征向量。

$$方差累计贡献率=\sum_{i=1}^{m}\lambda_i\Big/\sum_{i=1}^{p}\lambda_i \quad (3)$$

式中：m为选定的主成分数；λ_i为第i个主成分特征值。

1.3.2 相关系数 采用Pearson相关系数[18]、Spearman相关系数[19]、Kendall相关系数[20]是描述2个变

量间的联系紧密程度。Pearson相关系数衡量X和Y 2个变量间的线性相关关系，其值介于-1与1之间，绝对值越大，相关性越强。Spearman相关系数、Kendall相关系数通过对比X和Y 2个变量的秩统计量，分析2个变量间共同变化趋势。

1.3.3 通径分析 通径分析用于分析变量间的多元线性关系，以通径系数和间接通径系数关联自变量和因变量，且不受自变量变异程度及度量单位的影响[21]。自变量x_i对因变量y的通径分析[22]计算见式(4)、式(5)所示：

$$\begin{aligned} r_{1y} &= P_{1y} + r_{12}P_{2y} + \cdots + r_{1j}P_{jy} \\ r_{2y} &= P_{2y} + r_{21}P_{1y} + \cdots + r_{2j}P_{jy} \\ &\vdots \\ r_{iy} &= P_{iy} + r_{i1}P_{1y} + \cdots + r_{ij}P_{jy} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{其中，} P_{iy} = b_i \frac{\sigma_{xi}}{\sigma_y} \quad (5)$$

式中：r_{iy}为自变量x_i与因变量y的相关系数；P_{iy}为第i个自变量对因变量y的直接通径系数；$\Sigma r_{ij}P_{jy}$为第i个自变量通过其他第j个自变量对因变量y的间接效应；b_i为协方差；σ_{xi}、σ_y分别为x_i、y的标准差。

1.4 定量分析方法

1.4.1 敏感系数 敏感系数法是基于P-M模型，利用ET_0变化率与气象变量x变化率之比计算敏感系数，衡量ET_0变化对气象变量的敏感程度[23]，该方法公式如式(6)[24]所示：

$$S_x = \lim_{\Delta x/x \to 0}\left(\frac{\Delta ET_0/ET_0}{\Delta x/x}\right) = \frac{\partial ET_0}{\partial x} \times \frac{x}{ET_0} \quad (6)$$

式中：S_x为ET_0对气象变量x的敏感系数；$\Delta ET_0/ET_0$、$\Delta x/x$分别为ET_0、x的变化率；S_x精度受气象变量的变化Δx大小影响，Δx越小，精度越高[25]，$|S_x|$越大，表明越敏感。

1.4.2 贡献率计算 气象变量变化引发ET_0变化的相对变化率(记为贡献率)，利用敏感系数S_x和气象变量x多年相对变化率的乘积计算，贡献率为正值，表明气象变量变化促使ET_0增加，贡献率为负值，促使ET_0减少，计算公式如式(7)[26]所示：

$$\begin{aligned} C_x &= S_x \times Rc_x \\ Rc_x &= \frac{n \times Trend_x}{\bar{x}} \times 100\% \end{aligned} \quad (7)$$

式中：C_x为气象变量x促使ET_0变化的相对变化率(%)；Rc_x为n年间气象变量x的相对变化率；$Trend_x$为x线性变化率；$\bar{x}$均值；n年数。

2 结果与分析

2.1 ET_0多年变化特征

2.1.1 ET_0多年变化趋势 河西走廊及分区1984—2019年ET_0年际变化及特征值具体见表1、图2所示，河西走廊及分区均呈显著波动上升趋势(Z>1.98)，达到0.05显著水平。河西走廊ET_0线性变化率2.94 mm·a^{-1}，其中黑河分区变化最明显，其次是石羊河分区、疏勒河分区，线性变化率分别为4.78 mm·a^{-1}、2.33 mm·a^{-1}、1.98 mm·a^{-1}。河西走廊ET_0及各分区均表现为1984—1993年呈下降变化趋势，1994—2019年呈上升变化趋势，1993年前、后阶段变化趋势发生改变，河西走廊、疏勒河分区、黑河分区、石羊河分区1993年前、后阶段均值增加分别为5.11%、1.11%、7.82%、4.99%，黑河分区ET_0变化强烈。河西走廊、疏勒河分区、黑河分区、石羊河分区ET_0多年均值分别为1059.58 mm、1196.82 mm、1013.48 mm、978.70 mm，自西向东呈减少变化，符合气候环境条件变化规律，河西走廊西部地区降水稀少，蒸发量达到最大值，向东延伸至河西走廊中东部，降水增加，蒸发量减少，疏勒河分区比石羊河分区ET_0多约200 mm。各分区最大值出现在2010s，最小值出现在1990s，均呈波动上升，黑河分区最不稳定，离散系数0.059，其次是疏勒河分区、石羊河分区，波动变化稳定性增加。

表1 河西走廊及分区ET_0年际变化特征值

Tab. 1 Interannual variation characteristic values of ET_0 in the Hexi Corridor and subregion

分区	多年平均值/mm	离散系数	最大值/mm	最大值年份	最小值/mm	最小值年份	线性变化率/mm·a^{-1}	变化趋势	统计量Z值	显著性水平
河西走廊	1059.58	0.042	1152.16	2013	966.64	1993	2.943	↑	4.30	0.01
疏勒河分区	1196.82	0.039	1329.33	2018	1113.40	2003	1.975	↑	2.08	0.05
黑河分区	1013.48	0.059	1119.91	2017	904.49	1993	4.779	↑	5.38	0.01
石羊河分区	978.70	0.036	1054.01	2013	914.33	1992	2.331	↑	4.18	0.01

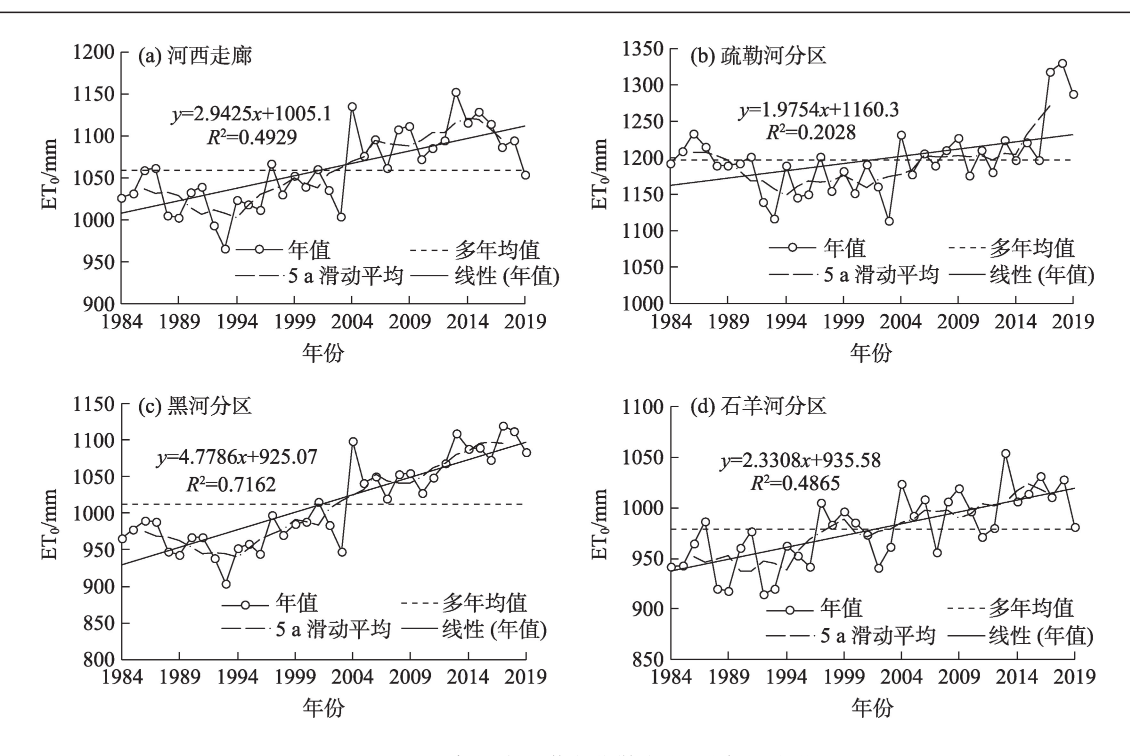


图2 河西走廊及分区潜在蒸散发(ET_0)年际变化

Fig. 2 Interannual variation of ET_0 in the Hexi Corridor and subregions

2.1.2 ET_0多年均值空间分布 基于河西走廊及周边21个气象站点多年均值数据，采用克里金空间插值方法进行空间插值，ET_0空间分布见图3a所示。ET_0空间分布差异明显，介于884.23~1314.63 mm之间，呈现由东南向西北递增的趋势，河西走廊中东部石羊河分区(1003.78 mm)、黑河分区(1031.30 mm)较小，西部疏勒河分区(1171.89 mm)较大。疏勒河分区、黑河分区、石羊河分区分别介于989.57~1313.56 mm、921.15~1141.14 mm、884.98~1098.77 mm，高值区位于酒泉市，低值区位于武威市、金昌市、张掖市南部。

ET_0线性变化率空间分布见图3b，黑河分区(4.45 mm·a^{-1})变化幅度最大，其次石羊河分区(2.99 mm·a^{-1})、疏勒河分区(1.36 mm·a^{-1})最小，黑河分区、石羊河分区、疏勒河分区大部分区域线性变化率分别介于4.54~7.88 mm·a^{-1}、2.90~4.54 mm·a^{-1}、0.32~2.90 mm·a^{-1}，酒泉市ET_0变化幅度小，张掖西部、酒泉东端变化幅度最大。河西走廊线性变化率介于−2.27~7.88 mm·a^{-1}，除新疆红柳河站(Z=−1.43)、青海大柴旦站(Z=0.36)、甘肃乌鞘岭站(Z=0.64)未达到0.05显著性水平，其他90%以上站点均显

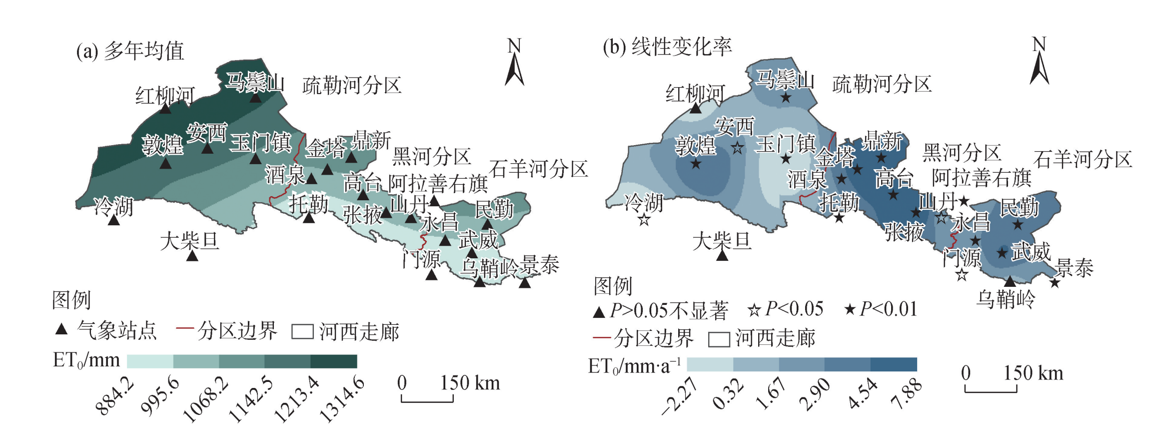


图3 河西走廊ET_0多年均值和线性变化率空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of average annual value and linear change rate of ET_0 in the Hexi Corridor

著变化，最大为7.92 mm·a^{-1}（张掖站），除河西走廊周边玉门镇站（−2.32 mm·a^{-1}）、新疆红柳河站（−1.03 mm·a^{-1}）、青海冷湖站（−2.10 mm·a^{-1}）为负值，其余站点均为正值，河西走廊大部分区域、黑河分区、石羊河分区ET_0均呈现显著上升趋势。

2.2 ET_0与气象因素关系定性分析

2.2.1 气象因素主成分及聚类分析 主成分分析将原始变量转化为几个线性互不相关的新变量，以80%~85%累计方差阈值提取主成分，尽可能多的保留原始信息，达到降维的目的[16]。对影响ET_0变化的日平均气温（T）、日最高气温（T_{max}）、日最低气温（T_{min}）、实际水汽压（e_a）、相对湿度（RH）、日最低相对湿度（RH_{min}）、日照时数（n）、日降水量（P）、平均风速（u）9个气象因素，进行主成分分析，结果见表2所示。提取前3个主成分，其累积方差占比88.35%，其中，第一主成分占比44.66%，携带信息最多，主要反映温度影响，成分载荷最大气象因素为T、T_{max}、T_{min}、e_a，第二主成分占比30.42%，主要反映湿度和辐射影响，成分载荷最大气象因素为RH、RH_{min}、n、P，第三主成分占比13.27%，主要反映风速影响，成分载荷最大气象因素为u。综上，主成分分析将原始9个变量转换为3类变量，前3主成分分别为温度因素、湿度和辐射因素、风速因素，温度因素对ET_0变化影响较大，风速因素影响相对较小。

系统聚类分析依据事物性质的相似性划分类别，揭示各气象变量间的内在联系，基于组间联接法和皮尔逊相关性的度量标准，得到聚类树状图。聚类分析将9个气象因素划分5类，T、T_{max}、T_{min}、e_a为Ⅰ型，体现温度对ET_0变化的作用；n、P分别为Ⅱ型、Ⅲ型，体现辐射、降水影响；RH、RH_{min}为Ⅳ型，体现湿度对ET_0变化的影响；u为Ⅴ型，体现风速影响。2种分析方法结果相似，相互验证。

2.2.2 ET_0与气象因素相关系数 采用Pearson相关系数、Spearman相关系数、Kendall相关系数对ET_0与9个气象因素关联程度进行分析，具体计算结果见表3所示。相关系数显示，ET_0与T、T_{max}、T_{min}、e_a相关性最强，Pearson相关系数0.696~0.925、Spearman相关系数0.765~0.941，Kendall相关系数0.549~0.782，其次是n、RH、RH_{min}、u，ET_0与P相关性最差。相关系数结果验证第一主成分载荷最大气象因素T、T_{max}、T_{min}、e_a与ET_0关系紧密。各气象因素与ET_0相关性排序为T_{max}、T、T_{min}、e_a、n、RH、RH_{min}、u、P。考虑到聚类分析气象因素划分5类，同类气象因素性质相似，相关密切，对ET_0变化产生重复作用，选定T_{max}、RH、n、u、P进行通径分析及定量分析。选取的5个气象因素与ET_0变化较紧密，且分属不同分组，反映多种影响ET_0变化的因素，避免同类关系紧密因素的重复作用影响。

2.2.3 气象因素对ET_0通径分析 根据气象因素聚类分析及相关系数分析结果，针对T_{max}、RH、n、u、P 5

表2 主成分载荷及聚类分析

Tab. 2 Principal component load and cluster analysis

方法	成分	特征值	方差百分比/%	累积/%	T	T_{max}	T_{min}	e_a	n	P	RH	RH_{min}	u
主成分分析	1	4.019	44.658	44.658	0.989	0.994	0.959	0.842	–	–	–	–	–
	2	2.738	30.419	75.077	–	–	–	–	−0.637	0.720	0.882	0.871	–
	3	1.195	13.272	88.350	–	–	–	–	–	–	–	–	0.947
聚类分析	–	–	–	–	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ

注：T为日平均气温；T_{max}为日最高气温；T_{min}为日最低气温；e_a为实际水汽压；n为日照时数；P为日降水量；RH为相对湿度；RH_{min}为日最低相对湿度；u为平均风速。下同。

表3 ET_0与气象变量相关系数

Tab. 3 Correlation coefficient between ET_0 and meteorological factors

气象因素		T	T_{max}	T_{min}	e_a	n	P	RH	RH_{min}	u
相关系数	Pearson	0.925	0.922	0.884	0.696	0.505	0.066	−0.400	−0.412	0.167
	Kendall	0.779	0.782	0.706	0.549	0.402	0.111	−0.307	−0.289	0.115
	Spearman	0.939	0.941	0.892	0.765	0.562	0.161	−0.443	−0.419	0.171
排序		2	1	3	4	5	9	6	7	8
选定指标			√			√	√	√		√

个气象因素进行通径分析，通径分析结果如表4所示。通径系数反映气象因素对ET_0变化的直接作用，RH、P与ET_0反向变化，RH、P增大促使ET_0减少，T_{max}、n、u与ET_0同向变化，T_{max}、n、u增大促使ET_0增加。对ET_0变化直接影响最大的因素是T_{max}，直接影响最小因素是P。间接通径系数反映其他气象因素通过某个气象因素对ET_0变化的间接作用，n为间接影响ET_0变化的主要因素，P是间接影响最小因素。相关系数代表综合作用，排序为T_{max}、n、RH、u、P，T_{max}、n对ET_0变化影响最大，P影响最小，T_{max}、n、u增大和RH减少促使ET_0增加变化。

2.3 ET_0对气象因素变化敏感性

利用河西走廊及周边21个气象站点T_{max}、RH、u、n、P多年均值敏感系数，采用反距离权重法进行空间插值，得到ET_0对T_{max}、RH、u、n、P的敏感系数S-T_{max}、S-RH、S-u、S-n、S-P空间分布图（图4）。S-T_{max}高值区分布在河西走廊东部黑河分区东部、石羊河分区，疏勒河分区南部为低值区，变化区间0.20~0.85，即T_{max}升高10%，ET_0增加2.0%~8.5%，温度升高促使ET_0增大。S-RH在黑河分区东部、石羊河分区南部、疏勒河分区中部略高，河西走廊S-RH介于−1.61~−0.43之间，RH与ET_0反向变化，即RH增加10%，ET_0减少4.3%~16.1%，ET_0对RH变化较为敏感。S-u自东南向西北递增，石羊河分区、黑河分区为低值区，疏勒河分区为高值区，敏感系数介于−0.06~0.47之间，即u增加10%，ET_0增加−0.6%~4.7%，局部站点出现负值，整体上，u与ET_0同向变化，ET_0对u变化不敏感。S-n空间分布与S-u相反，高值区位于黑河分区东部、石羊河分区，低值区位于疏勒河分区，敏感系数介于−0.44~0.75之间，即n增加10%，ET_0增加−4.4%~7.5%。S-P介于−0.01~−0.26之间，即P减少10%，ET_0增加0.1%~2.6%，ET_0对P变化最不敏感。综上，ET_0变化对气象因素敏感性排序为RH、T_{max}、n、u、P，ET_0对RH减少最敏感，其次T_{max}、n、u增加变化促使ET_0增大，ET_0对P变化最不敏感。

2.4 气象因素对ET_0变化贡献分析

气象变量对ET_0变化的贡献率计算结果如表5所示。ET_0对气象变量变化的敏感程度与气象变量对ET_0的贡献率排序不同，若敏感程度高的气象变量多年变化不显著，从而造成该气象变量贡献率低。河西走廊T_{max}多年升高6.14%，温度升高引起ET_0增加，正贡献率3.79%；RH与ET_0反向变化，因为RH多年相对变化率−3.96%，导致ET_0增加4.28%；尽管ET_0对u变化较不敏感，但u多年变化显著，增大15.39%，引起ET_0增加，正贡献率为4.61%；ET_0对n变化敏感性低，n多年增加0.72%引起ET_0增加，正贡献率为0.07%；ET_0对P变化敏感性低，P与ET_0反向变化，P多年增大42.96%引起ET_0增加贡献率为−5.33%。综上，u增大是造成河西走廊ET_0增大的主要原因，其次是RH、T_{max}、n。

河西走廊各分区中，疏勒河分区、黑河分区、石羊河分区ET_0增加贡献最大的气象因素分别为T_{max}（5.13%）、u（8.22%）、T_{max}（5.97%），贡献最小的气象因素为n。疏勒河分区气象因素贡献排序为T_{max}、P、u、RH、n；黑河分区气象因素贡献排序为u、RH、T_{max}、P、n；石羊河分区气象因素贡献排序为T_{max}、RH、P、u、n，各分区ET_0对气象因素变化敏感性排序一致，为RH、T_{max}、u、n、P，由于各气象因素多年变化差异，引起对ET_0变化贡献及排序不一致。

3 讨 论

河西走廊及分区均呈显著波动上升趋势（Z>1.98），达到0.05显著水平，ET_0线性变化率2.94 $mm \cdot a^{-1}$，其中黑河分区变化最明显，线性变化率4.78 $mm \cdot a^{-1}$。已有研究发现1961—2020年甘肃省ET_0呈现小幅上升的趋势[27]。河西走廊及各分区均呈现1960—1993

表4 ET_0变化通径分析

Tab. 4 Path analysis of ET_0 variation

气象因素	通径系数	间接通径系数						相关系数
		T_{max}	RH	n	u	P	Σ	
T_{max}	0.845	–	0.021	0.061	−0.005	0.000	0.077	0.922
RH	−0.084	−0.210	–	−0.072	−0.033	−0.001	−0.316	−0.400
n	0.140	0.370	0.043	–	−0.048	0.001	0.365	0.505
u	0.206	−0.019	0.014	−0.033	–	0.000	−0.039	0.167
P	−0.002	0.130	−0.037	−0.051	0.026	–	0.067	0.066

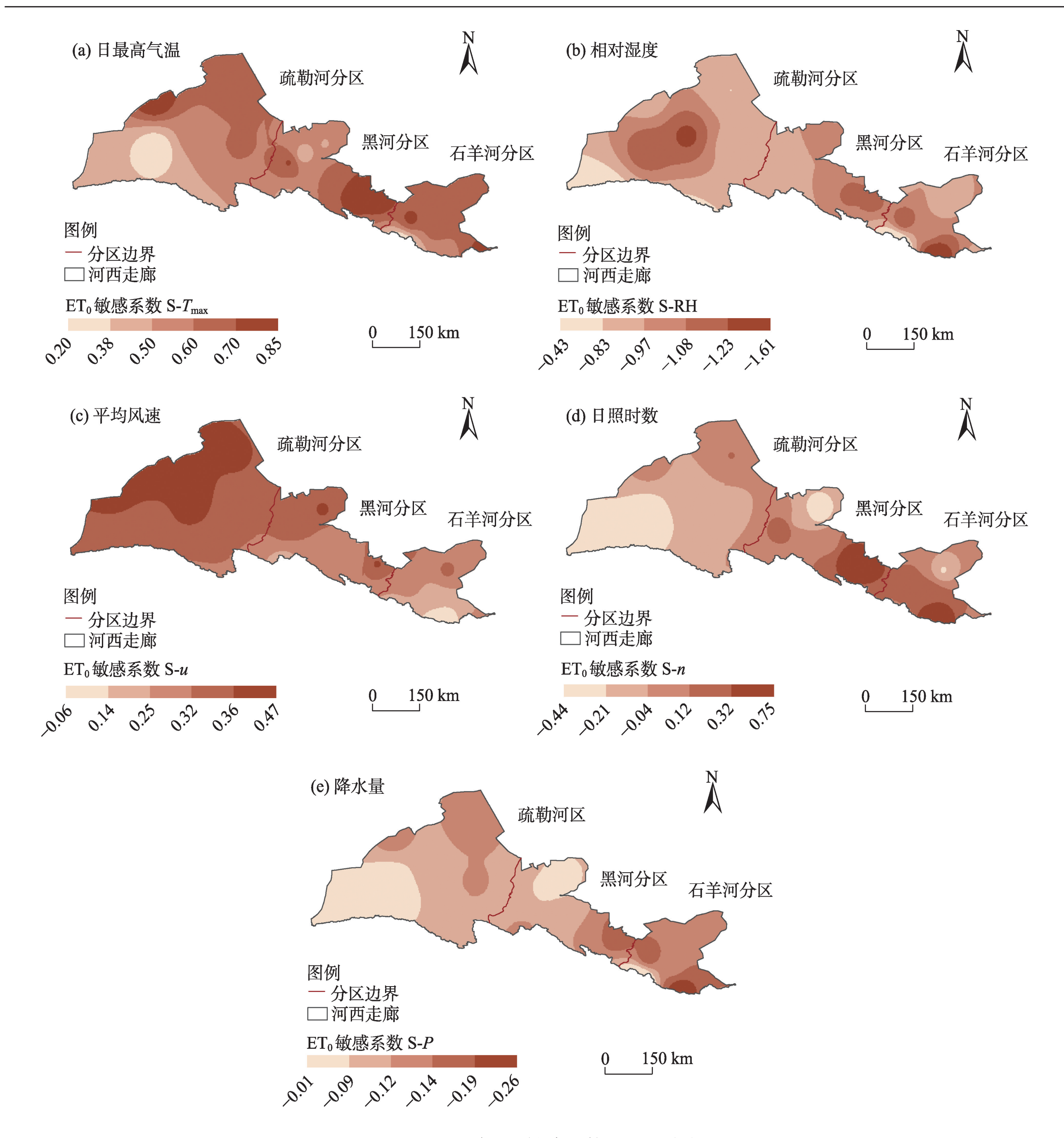


图4 河西走廊ET_0敏感系数的空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of ET_0 sensitivity coefficients in the Hexi Corridor

表5 河西走廊及分区气象变量对ET_0的贡献

Tab. 5 Contribution rates of meteorological factors to ET_0

气象因素	河西走廊			疏勒河分区			黑河分区			石羊河分区		
	敏感性系数	多年相对变化率/%	贡献率/%	敏感性系数	多年相对变化率/%	贡献率/%	敏感性系数	多年相对变化率/%	贡献率/%	敏感性系数	多年相对变化率/%	贡献率/%
T_{max}	0.617	6.14	3.79	0.519	9.88	5.13	0.631	10.61	6.70	0.544	10.97	5.97
RH	−1.082	−3.96	4.28	−0.867	1.49	−1.29	−1.003	−7.64	7.66	−0.901	−3.67	3.31
n	0.098	0.72	0.07	−0.158	0.20	−0.03	0.138	1.37	0.19	0.121	3.47	0.42
u	0.300	15.39	4.61	0.358	−10.50	−3.76	0.308	26.66	8.22	0.228	3.23	0.74
P	−0.124	42.96	−5.33	−0.099	40.51	−4.02	−0.113	30.75	−3.48	−0.118	13.31	−1.58

年ET_0减少变化，1994—2019年ET_0增加变化，研究结果与张彩霞等[28]关于河西地区1975—1993年ET_0趋于减少，而1994—2012年趋于增加，阴晓伟等[2]西北旱区以1993年为转折点，由显著下降的趋势转变为显著上升的结论一致。ET_0由东南向西北递增的趋势，与卓玛尼草[29]关于1960—2009年甘肃省ET_0自东南向西北递增、胡晓萌等[27]关于1961—2020年甘肃省ET_0西北高、东南低的结论一致。河西走廊中东部石羊河分区（1003.78 mm）、黑河分区（1031.30 mm）较小，西部疏勒河分区（1171.89 mm）较大。河西走廊自西到东依次分布疏勒河分区、黑河分区、石羊河分区，疏勒河分区多年均值ET_0最大，石羊河分区ET_0最小，符合ET_0自东南向西北递增的变化规律。

气象因素与ET_0相关性排序为T_{max}、T、T_{min}、e_a、n、RH、RH_{min}、u、P，相关系数表明ET_0与T、T_{max}、T_{min}、e_a相关性最强。验证了胡晓萌等[27]关于甘肃省1961—2020年ET_0对温度的相关程度最高，降水对各气候区ET_0变化作用最小的结论。RH对ET_0变化起反向作用，T_{max}、n、u升高和RH减少促进ET_0呈增加变化，与已有研究关于甘肃省ET_0与RH的相关系数为负值，与n、u和T_{max}的相关系数为正值结论一致[27,29]。河西走廊ET_0变化对气象因素敏感性排序为RH、T_{max}、n、u、P，ET_0对RH减少最敏感，其次T_{max}、n、u增加变化促使ET_0增大，ET_0对P变化最不敏感。与张春玲等[30]关于河西地区2001—2012年ET_0对RH变化最为敏感，其次为T_{max}的结论一致。u增大是造成河西走廊ET_0增大的主要原因，其次是RH、T_{max}、n。河西走廊各分区中，疏勒河分区、黑河分区、石羊河分区ET_0增加贡献最大的气象因素分别为T_{max}（5.13%）、u（8.22%）、T_{max}（5.97%），贡献最小的气象因素为n。研究结果与已有研究相关结论“1964—2018年西北旱区u和RH变化对ET_0的影响较大[2]”“1960—2009年河西冷温带和暖温带干旱区u和T_{max}对ET_0变化贡献显著[29]”基本一致。敏感因素和主要影响因素不同是由于贡献率是敏感系数和多年相对变化幅度共同决定的，ET_0变化对RH减少最敏感，但其多年相对变化幅度小，导致贡献与敏感系数排序一致。

本研究仅探讨了河西走廊ET_0变化的气候因素影响，即T_{max}、RH、n、u、P 5个气象因素与ET_0变化的响应关系，土地利用及覆被等下垫面条件变化也是ET_0变化重要原因[30]，因此全面揭示ET_0变化机理需要更为深入地探讨气候变化及地理环境改变等多方面的影响。研究将多种定性与定量分析方法有机结合，主成分分析、聚类分析、相关系数分析、通径分析从相关关系的角度定性探究ET_0变化的原因，敏感性分析、贡献率计算定量探寻ET_0变化对气候变量的敏感程度和气候变量的贡献，多种方法探索性结合，为揭示ET_0变化对气象变量的响应机理提供了一种新的思路，在西北暖湿变化背景下，科学预测河西走廊地区ET_0变化，制定合理灌溉用水计划，为促进农业水资源高效利用等方面提供科学决策依据。在干旱内陆河流域，农业用水在水资源总量中占比较大（超过60%），且蒸散发是水量消耗的主要途径[31]，农业用水严重挤占了生态用水，因此，通过科学预测ET_0变化及蒸散发耗水量，制定合理灌溉用水计划，推进农业节水措施的实施，可以有效减少农业用水量，减小农业用水压力，促使农业用水高效利用[32]。

4 结 论

（1）河西走廊及分区均呈显著波动上升趋势（$Z>1.98$），达到0.05显著水平，ET_0线性变化率2.94 $mm\cdot a^{-1}$，其中黑河分区变化最明显，线性变化率4.78 $mm\cdot a^{-1}$。ET_0由东南向西北递增的趋势，河西走廊中东部石羊河分区（1003.78 mm）、黑河分区（1031.30 mm）较小，西部疏勒河分区（1171.89 mm）较大。河西走廊大部分区域、黑河分区、石羊河分区ET_0均呈现显著上升趋势。

（2）主成分分析前3主成分分别为温度因素、湿度和辐射因素、风速因素，温度因素对ET_0变化影响较大，风速因素影响相对较小。系统聚类分析将9个气象因素划分5类，细化分类并验证主成分分析结果。相关系数表明ET_0与T、T_{max}、T_{min}、e_a相关性最强，验证第一主成分载荷最大的气象因素，与ET_0相关性排序为T_{max}、T、T_{min}、e_a、n、RH、RH_{min}、u、P。RH对ET_0变化起反向作用，T_{max}、n、u升高和RH减少促进ET_0呈增加变化。

（3）河西走廊ET_0变化对气象因素敏感性排序为RH、T_{max}、n、u、P，ET_0对RH减少最敏感，其次T_{max}、n、u增加变化促使ET_0增大，ET_0对P变化最不敏感。u增大是造成河西走廊ET_0增大的主要原因，其次是RH、T_{max}、n。河西走廊各分区中，疏勒河分区、黑河分区、石羊河分区ET_0增加贡献最大的气象因

素分别为T_{max}(5.13%)、u(8.22%)、T_{max}(5.97%),贡献最小的气象因素为n。

参考文献(References)

[1] 王燕鑫, 李瑞平, 李夏子. 河套灌区不同土地类型生长季蒸散发量估算及其变化特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 364-373. [Wang Yanxin, Li Ruiping, Li Xiazi. Estimation and variability of evapotranspiration for different land types during the growing season in the Hetao Irrigation District[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 364-373.]

[2] 阴晓伟, 吴一平, 赵文智, 等. 西北旱区潜在蒸散发的气候敏感性及其干旱特征研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 20-30. [Yin Xiaowei, Wu Yiping, Zhao Wenzhi, et al. Drought characteristics and sensitivity of potential evapotranspiration to climatic factors in the arid and semi-arid areas of northwest China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(3): 20-30.]

[3] 秦大河, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国西部生态环境变化与对策建议[J]. 地球科学进展, 2002, 17(3): 314-319. [Qin Dahe, Ding Yihui, Wang Shaowu, et al. Ecological and environmental change in west China and its response strategy[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(3): 314-319.]

[4] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in northwest China[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 152-164.]

[5] 黄会平, 曹明明, 宋进喜, 等. 1957—2012年中国参考作物蒸散量时空变化及其影响因子分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(2): 315-326. [Huang Huiping, Cao Mingming, Song Jinxi, et al. Temporal and spatial changes of potential evapotranspiration and its influencing factors in China from 1957 to 2012[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(2): 315-326.]

[6] 李霞, 刘廷玺, 段利民, 等. 科尔沁湿草甸参考作物蒸散发模拟分析[J]. 中国沙漠, 2020, 40(2): 134-143. [Li Xia, Liu Tingxi, Duan Limin, et al. Simulation of reference crop evapotranspiration and analysis of the factor effect in Horqin wet meadow[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(2): 134-143.]

[7] 郭雯雯, 黄生志, 赵静, 等. 渭河流域潜在蒸散发时空演变与驱动力量化分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 81-89. [Guo Wenwen, Huang Shengzhi, Zhao Jing, et al. Spatio-temporal dynamics and driving forces of potential evapotranspiration in the Wei River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(3): 81-89.]

[8] 郭小娇, 龚晓萍, 石建省, 等. 典型岩溶区潜在蒸散发变化及其影响因素[J]. 地质学报, 2019, 93(12): 3269-3281. [Guo Xiaojiao, Gong Xiaoping, Shi Jiansheng, et al. The temporal variations of potential evapotranspiration and influence factors for a typical karst area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 93(12): 3269-3281.]

[9] 刘昌明, 孙睿. 水循环的生态学方面: 土壤-植被-大气系统水分能量平衡研究进展[J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 251-259. [Liu Changming, Sun Rui. Ecological aspects of water cycle: Advances in soil-vegetation-atmosphere of energy and water fluxes[J]. Advances in Water Science, 1999, 10(3): 251-259.]

[10] Wen J, Wang X H, Guo M H, et al. Impact of climate change on reference crop evapotranspiration in Chuxiong City, Yunnan Province[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2012, 5: 113-119.

[11] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56[M]. Rome, Italy: FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

[12] 祝昌汉. 再论总辐射的气候学计算方法(二)[J]. 南京气象学院学报, 1982(2): 196-206. [Zhu Changhan. A further discussion on the climatological calculation method of total radiation (Ⅱ)[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1982(2): 196-206.]

[13] Hamed K H, Rao A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. Journal of Hydrology, 1998, 204(1-4): 182-196.

[14] Sung J H, Chung E S, Kim Y, et al. Meteorological hazard assessment based on trends and abrupt changes in rainfall characteristics on the Korean Peninsula[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017, 127(1-2): 305-326.

[15] 高惠璇. 应用多元统计分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005. [Gao Huixuan. Application of multivariate statistical analysis[M]. Beijing: Peking University Press, 2005.]

[16] 屈家安, 曹杰. 主成分分析与聚类分析在青岛夏季气温变化研究中的应用[J]. 大气科学学报, 2014, 37(4): 517-520. [Qu Jia'an, Cao Jie. Application of principal component analysis and cluster analysis in a study on the change of summer temperature in Qingdao[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2014, 37(4): 517-520.]

[17] 何亮. 主成分分析在SPSS中的应用[J]. 山西农业大学学报(社会科学版), 2007, 6(5): 20-22. [He Liang. Principal components analysis in SPSS[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Social Science Edition), 2007, 6(5): 20-22.]

[18] Pearson K. Notes on the history of correlation[J]. Biometrika, 1920, 13(1): 25-45.

[19] Spearman C. General intelligence, objectively determined and measured[J]. The American Journal of Psychology, 1904, 15(2): 201-292.

[20] Kendall M. A new measure of rank correlation[J]. Biometrika, 1938, 30(1): 81-93.

[21] 杜家菊, 陈志伟. 使用SPSS线性回归实现通径分析的方法[J]. 生物学通报, 2010, 45(2): 4-6. [Du Jiaju, Chen Zhiwei. Path analysis using SPSS linear regression[J]. Bulletin of Biology, 2010, 45 (2): 4-6.]

[22] 敬艳辉, 邢留伟. 通径分析及其应用[J]. 统计教育, 2006(2): 24-26. [Jing Yanhui, Xing Liuwei. Path analysis and its application

[J]. Statistical Education, 2006(2): 24-26.]
[23] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 579-588. [Liu Changming, Zhang Dan. Temporal and spatial change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological influencing factors in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 579-588.]
[24] Beven K. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates[J]. Journal of Hydrology, 1979, 44(3): 169-190.
[25] 杨林山, 李常斌, 王帅兵, 等. 洮河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 102-109. [Yang Linshan, Li Changbin, Wang Shuaibing, et al. Sensitive analysis of potential evapotranspiration to key climatic factors in Taohe River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(11): 102-109.]
[26] Yin Y H, Wu S H, Chen G, et al. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 101(1/2): 19-28.
[27] 胡晓萌, 张鑫, 雒舒琪, 等. 甘肃省不同气候区1961—2020年蒸散发时空变化及其影响因子[J]. 节水灌溉, 2022(11): 73-78. [Hu Xiaomeng, Zhang Xin, Luo Shuqi, et al. Temporal and spatial changes of potential evapotranspiration and its influencing factors in different climatic regions of Gansu Province from 1961 to 2020 [J]. Water Saving Irrigation, 2022(11): 73-78.]
[28] 张彩霞, 花婷, 郎丽丽. 河西地区潜在蒸散发量变化及其敏感性分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 357-362. [Zhang Caixia, Hua Ting, Lang Lili. Analysis of potential evapotranspiration and its sensitivity in Hexi region[J]. Research of Soil and Water Conversation, 2016, 23(4): 357-362.]
[29] 卓玛兰草. 甘肃省1960—2009年不同气候区潜在蒸散量敏感性分析研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2012. [Zhuo Malancao. Sensitivity of the potential evapotranspiration to different climatic regions from 1960 to 2009 in Gansu Province[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2012.]
[30] 张春玲. 基于S-W模型的河西地区潜在蒸散发对气候和植被的敏感性研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2014. [Zhang Chunling. Sensitivity of the potential evapotranspiration to climate and vegetation in Hexi Area based on S-W model[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2014.]
[31] 杨一飞, 杨鹏年, 汪昌树, 等. 新疆焉耆盆地农田耗水有效性评价[J]. 干旱区地理, 2023, 46(5): 730-741. [Yang Yifei, Yang Pengnian, Wang Changshu, et al. Effectiveness evaluation of water consumption in agricultural land of Yanqi Basin, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(5): 730-741.]
[32] 潘子豪, 杨胜天, 娄和震, 等. 缺测站干旱流域生态输水遥感监测与农业节水效益分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 774-785. [Pan Zihao, Yang Shengtian, Lou Hezhen, et al. Remote sensing monitoring of ecological water conveyance and benefits evaluation of agricultural water-saving in arid basin without observation station[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 774-785.]

Relationship between changes in spatial and temporal patterns of potential evapotranspiration and meteorological factors in the Hexi Corridor

MA Yali, NIU Zuirong, SUN Dongyuan

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Several factors affect the evapotranspiration process. Potential evapotranspiration (ET_0) interacts with meteorological variables in a complex manner. Therefore, there is an urgent need to determine the response mechanism of ET_0 changes to meteorological variables. Based on meteorological data from 21 meteorological stations in the Hexi Corridor, Gansu Province, China and its surrounding areas, qualitative and quantitative methods were adopted to reveal the spatiotemporal variation of ET_0 and to clarify the sensitivity of ET_0 to changes in various meteorological factors and contributions by taking two spatial scales of the Hexi Corridor as a whole and three subdistricts. The results showed the following: (1) ET_0 in both the Hexi Corridor and the subdistrict showed a significant fluctuating upward trend (Z>1.98), with a linear change rate of 2.94 mm·a^{-1}, and the most obvious change was observed in the Heihe subdistrict. (2) ET_0 increased from the southeast to northwest. It was smaller in the Shiyang River subdistrict (1003.78 mm) and Heihe subdistrict (1031.30 mm) in the central and eastern parts of the Hexi Corridor, and larger in the Shule River subdistrict (1171.89 mm) in the western part of the Hexi Corridor. (3) The sensitivity of ET_0 to changes in meteorological factors in the Hexi Corridor was ranked as relative humidity (RH), daily maximum temperature (T_{max}), sunshine duration (n), average wind speed (u), and daily rainfall (P), with ET_0 being the most sensitive to decreases in RH and least sensitive to changes in P. (4) The increase in u was the main cause of the increase in ET_0 in the Hexi Corridor, followed by a decrease in RH, increase in T_{max}, and increase in n. (5) The ET_0 in the subdistricts of the Shule River, Heihe River, and Shiyang River showed an increasing change, with the factors that contributed the most being T_{max} (5.13%), u (8.22%), and T_{max} (5.97%), respectively, and the factor that contributed the least being n. Variations in wind speed and air temperature were important factors that influenced the ET_0 change in the Hexi Corridor. The research results are significant for the rational planning of irrigation water use and improvement of the utilization efficiency of agricultural water resources.

Key words: potential evapotranspiration; meteorological variables; response; quantitative relation; Hexi Corridor